



Référentiel technique

Les installations photovoltaïques autonomes pour l'éclairage Public



AGENCE NATIONALE POUR
LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE
ANME

Un engagement durable et renouvelable

Elaboré par

Agence Nationale pour la Maitrise de l'Energie (ANME)

Cité Administrative Montplaisir, Avenue de Japon B.P.213

T +216 71 906 900

F +216 71 904 624

E boc@anme.nat.tn

W www.anme.nat.tn

En partenariat avec

Projet de Renforcement du Marché Solaire en Tunisie

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

B.P. 753, 1080 Tunis-Cedex Tunesien / Tunisie

T +216 71 901 355

F +216 71 908 960

E info@giz.de

W www.giz.de

Responsables

Karim Nefzi, ANME

Mohamed Ali Farhat, ANME

Sana Kacem, ANME

Mohamed Maghrebi, GIZ

Historique de modifications

Version	Date	Nature de la révision (Validée par le groupe Ad hoc)
V-1	08-11-2018	Création et Validation

Membres du groupe Ad-hoc « Eclairage Public »

ANME	Agence Nationale pour la Maitrise de l'Energie
MEHAT	Ministère de l'équipement, de l'habitat et de l'aménagement du territoire
Municipalité de Tunis	
CPSC	Caisse des Prêts et de Soutien des Collectivités Locales
CFAD	Centre de Formation et d'Appui à la Décentralisation
CSPV	Chambre Syndicale du Photovoltaïque en Tunisie
ASSAD Tunisie	Fabricant local des batteries

SOMMAIRE

Avant-propos	6
Systèmes photovoltaïques autonomes pour l'éclairage public.....	7
1. Types de systèmes.....	7
2. Schéma de principe.....	7
Exigences relatives au niveau et à l'uniformité de l'éclairage.....	8
1. L'uniformité de l'éclairage.....	8
2. l'éclairage lumineux.....	8
3. L'intensité lumineuse :.....	8
4. Indice d'éblouissement (TI).....	8
5. Rapport de contiguïté (sr).....	8
6. Valeurs photométriques.....	8
Composants et critères de choix des systèmes photovoltaïques d'éclairage public:.....	10
1. Modules photovoltaïques	10
2. Mât	10
2.1. Types et caractéristiques.....	10
2.2. Critères de choix	10
3. Supports de modules	10
3.1. Caractéristiques techniques	10
3.2. Matériaux constitutifs.....	11
4. Crosses	11
4.1. Types et caractéristiques :.....	11
4.2. Critères de choix :	11
5. Luminaires.....	11
5.1. Types et normes applicables.....	11
5.2. Caractéristiques techniques.....	12
5.3. Critères de choix	12
6. Coffre à batterie.....	12
6.1. Types et caractéristiques.....	12
6.2. Critères de choix	12
7. Visseries.....	12
8. Régulateur de charge/décharge.....	12
8.1. Types de régulateurs de charge/décharge.....	13
8.2. Caractéristiques des régulateurs charge/décharge.....	13
8.3. Critères de choix	13
9. Batterie	14
9.1. Composition	14
9.2. Principe de fonctionnement.....	14
9.3. Durée de vie de la batterie	14
9.4. Caractéristiques de la batterie.....	14
9.5. Critères de choix	15
10. Câblage des systèmes photovoltaïques pour l'éclairage public.....	15
10.1. Câbles	15
10.2. Les connecteurs	16
11. Fusible de batterie.....	16
12. Portes fusibles.....	17
Conception & dimensionnement des systèmes photovoltaïques d'éclairage public.....	18
1. Définition du besoin électrique	18
1.1. Calculs des besoins électriques.....	18
2. Evaluation du gisement solaire local	18
2.1. Angle d'inclinaison optimale	18
3. Performance d'une installation photovoltaïque d'éclairage public	18
3.1. Puissance crête et performances des modules	18
3.2. Rendement du régulateur.....	19
3.3. Rendement des batteries	19
3.4. Calcul des pertes.....	19
3.5. Rendement global de l'installation photovoltaïque d'éclairage public.....	20
4. Dimensionnement du parc de batteries.....	21
4.1. Choix de la tension du parc de batteries.....	21
4.2. Choix de la capacité du parc de batteries	21
5. Puissance crête du générateur photovoltaïque.....	21

6. Dimensionnement du générateur photovoltaïque	22
7. Choix du régulateur de charge/décharge	22
8. Dimensionnement des câbles DC	22
8.1. Courant admissible des câbles DC	23
8.2. Chute de tension dans la partie DC	23
9. Notes de calcul.....	23
Installation et mise en service des photovoltaïques d'éclairage public	24
1. Choix de l'emplacement du système d'éclairage public.....	24
2. Mise en œuvre des massifs des candélabres.....	24
3. Pose des mâts et crosses	24
4. Implantation du support modules	25
5. Fixation des modules	25
6. Pose des luminaires à LED.....	25
7. Installation du régulateur de charge/décharge	25
8. installation des batteries.....	26
8.1. Principes à respecter pour les groupements des batteries :	26
9. Câblage.....	26
9.1. Câbles DC.....	26
9.2. Usage des connecteurs.....	27
10. Signalisation	27
11. Mise en services.....	27
11.1. Inspection visuelle	27
11.2. Mesures	28
12. Dossier technique.....	28
Maintenance et exploitation du système photovoltaïque d'éclairage public	29
1. Entretien et maintenance	29
1.1. Types de maintenance et périodicité.....	29
1.2. Sécurité de l'intervention sur une installation photovoltaïque d'éclairage public	29
2. Contrat de maintenance	30
Dimensionnement d'une installation photovoltaïque d'éclairage public.....	31
Premier cas :	31
1. Calcul des besoins électriques.....	31
2. Evaluation du gisement solaire local	31
2.1. Angle d'inclinaison optimale	31
2.2. Rendement global de l'installation photovoltaïque d'éclairage public	31
2.3. Puissance crête du générateur photovoltaïque.....	31
2.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	32
3. Dimensionnement du parc de batteries.....	32
3.1. Choix de la tension du parc de batteries	32
3.2. Choix de la capacité du parc de batteries	32
4. Choix du régulateur de charge/décharge	32
5. Dimensionnement des câbles DC	33
Deuxième cas :	33
1. Calcul des besoins électriques.....	33
2. Evaluation du gisement solaire local	34
2.1. Angle d'inclinaison optimale.....	34
2.2. Rendement global de l'installation photovoltaïque d'éclairage public	34
2.3. Puissance crête du générateur photovoltaïque.....	34
2.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque.....	34
3. Dimensionnement du parc de batteries.....	34
3.1. Choix de la tension du parc de batteries	34
3.2. Choix de la capacité du parc de batteries	34
4. Choix du régulateur de charge/décharge	35
5. Dimensionnement des câbles DC	35

AVANT-PROPOS

Dans le cadre de la mise en œuvre de la politique de l'état dans le domaine des énergies renouvelables et spécialement la promotion des systèmes photovoltaïques autonomes pour l'éclairage public, l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME) compte mobiliser les potentiels importants dans cette activité à travers une approche méthodique, transparente et garantissant la qualité et la conformité des prestations fournies à un référentiel technique.

Ce référentiel a été élaboré par l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME) en partenariat avec le projet "Renforcement du Marché Solaire en Tunisie" (RMS), lancé par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

L'objectif de ce référentiel technique est de mettre à la disposition des différents intervenants et opérateurs dans le domaine, un document de référence pour la conception, la fourniture, l'installation et l'exploitation des installations photovoltaïques pour l'éclairage public dans le respect de critères de qualité et de durabilité.

En se référant à ce document, les intervenants et opérateurs du secteur seront en mesure de :

- Dimensionner et choisir les composants des systèmes photovoltaïques pour l'éclairage public selon les besoins des utilisateurs ;
- Analyser et valider les dossiers et les propositions techniques relatifs à la réalisation de systèmes photovoltaïques pour l'éclairage public ;
- Assurer la réception technique des installations photovoltaïques pour l'éclairage public en conformité aux dossiers techniques, selon les règles de l'art et en respectant la meilleure performance technique et énergétique ;
- Conseiller et orienter les intervenants et les clients (Bénéficiaires, institutions et établissement publics ou privés...) pour réaliser les installations photovoltaïques susmentionnées conformément aux exigences et normes en vigueur.

Le présent référentiel est destiné aux :

- Etablissements concernés par le développement des énergies renouvelables dans le secteur de l'éclairage public (ANME, MEHAT, Municipalités, Conseils régionaux des gouvernorats...) ;
- Fournisseurs et installateurs des systèmes photovoltaïques pour l'éclairage public ;
- Opérateurs de service dans le domaine : bureaux d'études, bureaux de contrôle,...

SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES POUR L'ECLAIRAGE PUBLIC

A travers les systèmes photovoltaïques autonomes pour l'éclairage public, l'énergie photovoltaïque produite pendant la journée est stockée directement dans des batteries et utilisée pendant la nuit pour alimenter les luminaires de l'éclairage public.

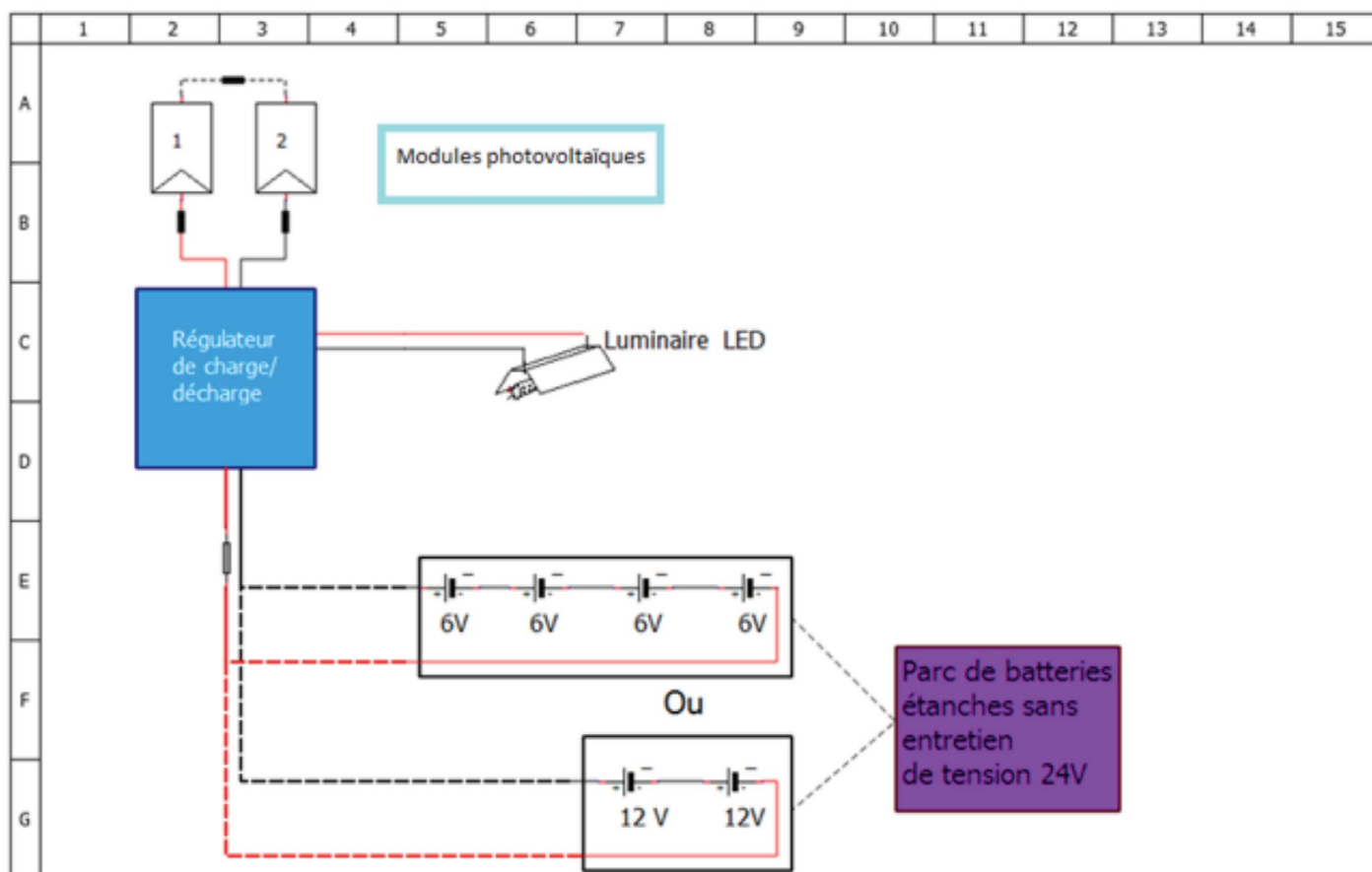
1. Types de systemes

Les principaux types de systèmes autonomes pour l'éclairage public qui intègrent les modules photovoltaïques sont :

- Les systèmes photovoltaïques individuels pour l'éclairage public (les lampadaires solaires) : Un lampadaire solaire emmagasine de l'énergie durant la journée, les modules photovoltaïques rechargent les batteries. La nuit, à une heure choisie, le lampadaire s'allume en utilisant ainsi uniquement l'énergie contenue dans ses batteries.
- Les systèmes d'éclairage photovoltaïques centralisés : systèmes photovoltaïques autonomes centralisés alimentant des lampadaires d'éclairage public.
- Ce référentiel traitera les systèmes photovoltaïques d'éclairage public individuels étant donné que les systèmes centralisés d'éclairage public peuvent être considérés comme des systèmes photovoltaïques autonomes pour l'électrification rurale.

2. Schéma de principe

Le schéma de principe d'un système photovoltaïque autonome présenté ci-après est donné à titre indicatif, pour chaque type de système fourni, le maître d'œuvre est tenu de présenter un schéma de principe exhaustif et représentatif du système à installer.



Shéma de principe d'un système photovoltaïque d'éclairage public

EXIGENCES RELATIVES AU NIVEAU ET A L'UNIFORMITE DE L'ECLAIREMENT

1. L'uniformite de l'éclairage

L'uniformité (Uo) ou facteur d'uniformité d'éclairage, définie comme le rapport de l'éclairage minimum à l'éclairage moyen, est le reflet de l'homogénéité de l'éclairage. La valeur exigée est fonction de la tâche visuelle à exécuter. On peut observer une uniformité longitudinale (calculée parallèlement à la voie) et transversale (calculée perpendiculaire à la voie).

2. L'éclairage lumineux

C'est la densité de lumière sur une surface. Il s'exprime par la formule : $E = F/S$ où F est la valeur du flux lumineux atteignant la surface et S l'aire de cette surface réceptrice. L'éclairage s'exprime en lux (lx). C'est cette valeur que nous pouvons mesurer avec un luxmètre.

On distingue donc 3 types d'éclairages :

- Eclairage moyen initial (Eo) : c'est la base des projets d'éclairage. Cette valeur est obtenue à la mise en service de l'installation, après stabilisation des lampes (généralement 100 heures de fonctionnement).
- Eclairage moyen en service (Es) : c'est la valeur obtenue en cours d'utilisation. On considère généralement la valeur au milieu de la maintenance.
- Eclairage moyen maintenu (Em) : c'est l'éclairage subsistant juste avant les interventions d'entretien (remplacement des lampes et nettoyage des luminaires). Cet entretien permet en principe de revenir à l'éclairage initial (Eo).

Le niveau d'éclairage n'est pas constant dans le temps. Il diminue progressivement en raison de différents phénomènes :

- L'empoussièrement et le vieillissement des luminaires.
- L'usure des lampes.
- L'empoussièrement et le vieillissement des luminaires.

3. L'intensité lumineuse

L'éclairage ne doit pas être confondu avec l'intensité lumineuse. Celle-ci exprimée en candela(cd). C'est le flux lumineux émis par unité d'angle solide dans une direction donnée. C'est la base photométrique du système SI (Système International d'unités). La répartition de l'intensité dans l'espace est représentée habituellement par une courbe photométrique.

4. Indice d'éblouissement (TI)

Pour une installation d'éclairage, la valeur de l'indice d'éblouissement « TI » est calculée dans le projet d'éclairage ; elle doit être inférieure à une valeur limite donnée dans le tableau de la norme. L'éblouissement lié à la luminance de voile et aux réflexions indésirables peut être atténué par une disposition judicieuse du poste de travail et des luminaires, une limitation de la luminance ou une augmentation de la surface lumineuse de ceux-ci.

5. Rapport de contiguïté (SR)

Le rapport de contiguïté de l'éclairage d'une chaussée (SR) est le rapport de l'éclairage moyen des bandes situées juste à l'extérieur des bords de chaussée à l'éclairage moyen des bandes situées à l'intérieur des bords de chaussée.

6. Valeurs photométriques

Les mesures photométriques doivent respecter les normes suivantes :

- NT 87.61-1(2013) - EN 13032-1:2004 + A1:2012: Lumière et éclairage - Mesure et présentation des données photométriques des lampes et des luminaires - Partie 1: Mesurage et format de données
- La norme UNI EN 11356.
- La norme NF 13201.

Les valeurs indiquées au niveau du tableau ci-dessous sont des exigences minimales à respecter. Les valeurs exactes sont à déterminer selon l'implantation spécifiée pour chaque site du projet et doivent être calculées sur la base d'un facteur de maintenance ((Eclairage moyen d'exploitation/Eclairage initial) de 0,9 pour une hauteur au feu de 7 à 7,5 m (la hauteur de la crosse) et une inter-distance minimale égale à 2,5 fois la hauteur au feu.

Le type d'implantation des mâts est spécifié selon le cas :

- Voie bidirectionnelle avec tracé rectiligne et/ou en courbe : implantation unilatérale
- Carrefour giratoire ou en croix : implantation à spécifier sur le lieu. Toutefois, les calculs photométriques à prendre en compte seront réalisés en considérant la voie la plus large parmi les différentes branches.

Pour des raisons particulières à l'éclairage public photovoltaïque (site hors agglomération et baisse de trafic la nuit) et compte tenu des paramètres spécifiques à la géométrie des routes et leur trafic journalier, la classe d'éclairage à considérer est ME3a pour les 5 premières heures et ME4 pour le reste de la nuit :

Paramètres	Valeurs en ME3a	Valeurs en ME4
Luminance moyenne	$l_m > 1 \text{ cd/m}^2$	$l_m > 0,75 \text{ cd/m}^2$
Uniformité longitudinale	$U_l \geq 0,7$	$U_l \geq 0,6$
Uniformité générale	$U_0 \geq 0,4$	$U_0 \geq 0,4$
Indice TI	$TI \leq 15$	$TI \leq 15$
Indice SR	$SR \geq 0,5$	$SR \geq 0,5$

Pour le cas des giratoires ou carrefours, l'éclairage moyen minimal à maintenir est de 20 lux avec une uniformité moyenne d'éclairage $U_m = E_{min} / E_{moy}$ supérieure à 0,4 et un éclairage minimal de 8 lux.

COMPOSANTS ET CRITERES DE CHOIX DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES D'ECLAIRAGE PUBLIC

1. Modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques convertissant la lumière en électricité. Ils jouent le rôle de générateur dans les systèmes photovoltaïques autonomes.

Quelle que soit leur technologie, les modules photovoltaïques doivent être conformes aux normes :

- CEI 61 215 : Modules photovoltaïques au silicium cristallin pour application terrestre- Qualification de la conception et homologation ;
- CEI 61646 : Modules photovoltaïques en couches minces à usage terrestre- Qualification de la conception et homologation ;
- CEI 60 904-3 : Dispositifs photovoltaïques - Partie 3 : Principes de mesure des dispositifs solaires photovoltaïques à usage terrestre incluant les données de l'éclairement spectral de référence ;
- CEI 61 730 : qualification pour la sûreté de fonctionnement des modules photovoltaïques ;
- EN 50 548 : Boîtes de connexion pour module photovoltaïque ;
- NF EN 50380 : Spécifications particulières et informations sur les plaques de constructeur pour les modules photovoltaïques,

Pour l'admissibilité au marché national, les modules photovoltaïques doivent avoir un certificat d'homologation délivré par l'Agence Nationale pour la Maîtrise de l'Energie (ANME).

Pour chaque module photovoltaïque installé, les données réelles déterminées par le « Flash test » doivent être fournies au client et dans le dossier technique.

2. MAT

2.1. Types et caractéristiques

Un mât qui peut supporter un ou plusieurs luminaires, les modules solaires photovoltaïques et éventuellement la pose des batteries et le régulateur de charge/décharge, se compose en général de plusieurs parties :

- Le fût : Partie principale ou unique du mât ;
- La plaque d'appui : Cette plaque assure la liaison entre le massif de fondation et le fût;
- Les tiges de scellement.

2.2. Critères de choix

Le mât doit être associé au : luminaire(s), module(s) photovoltaïque(s), régulateur de charge et coffre pour pose de batteries doit être dimensionné pour résister aux efforts dus au vent et aux chocs normaux, et aussi résister aux intempéries et à la corrosion.

Il doit respecter les critères suivants :

- En tôle d'acier galvanisé à chaud, d'épaisseur minimale de 4 mm de forme cylindro-conique à section décroissante pour les systèmes d'éclairage public de hauteur 7 m et d'épaisseur minimale de 5 mm de forme cylindro-conique à section décroissante pour les systèmes d'éclairage public de hauteur 9 m. La protection contre la corrosion de la plaque d'appui et du mât à sa partie basse et sur une hauteur de 0.30m, doit être renforcée par application de deux couches de résine marine.
- Plaque d'appui d'épaisseur garantissant sa stabilité (10mm minimum) et de dimension 400mmx400mm pour les mâts de hauteur 7m et de 500mmx500mm pour les mâts de hauteur 9m,
- Entre axes des trous de fixation 300mmx300mm pour les mâts de hauteur 7m et de 400mmx400mm pour les mâts de hauteur 9m,
- Tiges de scellements en fer strié M24 et de longueur 70cm, partie filetée de 8cm au minimum.

3. Supports de modules

3.1. Caractéristiques techniques

Les supports des modules photovoltaïques à utiliser devront être métalliques. Cette charpente est réalisée en aluminium, en acier galvanisé à chaud ou en acier inoxydable. Ce choix de matériau est justifié par

des contraintes d'implantation telles que :

- Résistance mécanique (vent) ;
- Tenue aux effets des intempéries (corrosions, etc.) ;
- Conductivité thermique ;
- Facilité d'assemblage ;
- Poids, etc.

3.2. Matériaux constitutifs

Les matériaux constitutifs des supports de modules photovoltaïques doivent être capables de résister à 10 ans d'exposition extérieure sans corrosion ou fatigue notables.

Les matériaux constitutifs suivants sont admis :

- Acier inoxydable,
- Acier galvanisé à chaud en conformité aux exigences de la norme ISO 1461 :2009 (Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis en fonte et en acier Spécifications et méthodes d'essai),
- Aluminium anodisé.

4. Crosses

La crosse est une console de forme courbe qui vient se fixer sur le mât et qui porte à son extrémité le dispositif d'éclairage.

Le dimensionnement de la crosse doit être effectué selon les normes NV65, CM66 et EN 40.

La galvanisation à chaud des crosses doit être réalisée par immersion complète selon la norme NF EN ISO 1461.

4.1. Types et caractéristiques :

Les crosses en acier doivent être en acier galvanisé à chaud et de forme tubulaire dont le diamètre est à choisir en adéquation avec la fixation du luminaire.

Elles devront assurer avec le mât, la hauteur au feu demandée.

4.2. Critères de choix :

Outre les caractéristiques susmentionnées, la crosse doit avoir une saillie et une inclinaison permettant de garantir les valeurs photométriques recommandées.

5. Luminaires

5.1. Types et normes applicables

Les luminaires doivent être de type LED et doivent être certifiés par un laboratoire de contrôle agréé, indépendant et accrédité. Ils doivent être conformes aux normes suivantes :

- NF EN 60598-2 pour la sécurité électrique,
- Norme EN 55015 pour compatibilité électromagnétique,
- EN 62471 pour la sécurité photobiologique,
- EN 61547 pour les exigences concernant l'immunité CEM,
- NF EN 13032-1 : Lumière et éclairage - Mesure et présentation des données photométriques des lampes et des luminaires - Partie 1 : Mesurage et format de données,
- NF EN 13032-2 : Mesure et présentation des caractéristiques photométriques des lampes et luminaires - Partie 2 : Présentation des données utilisées dans les lieux de travail intérieurs et extérieurs,
- EN 61000-3-2 au niveau harmonique avec un taux de distorsion harmonique sur le courant inférieur à 25 %,
- IEC 60529 : Degrés de protection procurés par les enveloppes (Code IP).

Les sources lumineuses seront du type luminaire à LED (SMD ou COB) équipé de driver "dimmable" fonctionnant au courant continu avec protection contre les surtensions d'une valeur de 10 kV. Le corps

doit être conçu et dimensionné pour supporter et dégager la chaleur produite par les LEDs et pour éviter que leurs températures n'excèdent pas celle de fonctionnement.

5.2. Caractéristiques techniques

Les luminaires LED à utiliser dans l'éclairage public doivent respecter les caractéristiques suivantes :

- Puissance du luminaire complet à 100% de charge : maximum 60W,
- Tension : 12 V, 24 V,
- Efficacité minimale du luminaire (flux lumineux total sortant du luminaire divisé par la puissance totale du luminaire auxiliaire d'alimentation compris): $\geq 110 \text{ lm/W}$.
- Facteur de puissance $\geq 0,9$ quelle que soit la puissance,
- Flux lumineux utile du luminaire complet : $\geq 5400 \text{ lm}$,
- Température de couleur comprise entre 4000°K et 6000°K sauf indication contraire du client
- Durée de vie calculée à 25°C $\geq 50\,000$ heures avec une chute de flux lumineux $\leq 20 \%$ après 5000 heures de fonctionnement,
- Durée de vie du driver : 50000 heures,
- Corps : avec radiateur pour le dégagement de la chaleur,
- IP :65,
- Indice de Rendu de Couleur (IRC) supérieur à 70,
- Température de fonctionnement comprise entre -10°C et 55°C,
- Humidité relative de fonctionnement jusqu'à 80%.

5.3. Critères de choix

Le choix des luminaires à LED doit prendre en considération les caractéristiques ci-dessus mentionnées.

6. Coffre à batterie

Le coffre à batterie est dédié à la protection de parcs de batteries. Selon la configuration de son installation (haut du mât ou au sol), il assure la fonction de protection mécanique et de bac de rétention pour l'électrolyte.

6.1. Types et caractéristiques

Le coffre à batterie doit être :

- En acier galvanisé à chaud (si installé haut du mât),
- En PVC ou matériau adéquat (si installé dans une fosse au sol) et moulé sans soudure ni collage (pour les coffres en PVC),
- Résistant à l'usure,
- Intérieur lisse (pour un nettoyage facile),
- De dimensions capables d'abriter les batteries,
- Avec passage de câbles par presse étoupes traités UV,
- Indice de protection : IP 65.

6.2. Critères de choix

Selon son emplacement, le choix du coffre à batterie se fait en respectant les critères susmentionnés

7. Visseries

La visserie doit être conforme aux normes NFE 03 001 et 03 014.

Les vis doivent :

- Être protégées contre la corrosion par cadmiage et permettre un serrage efficace et durable.
- Supporter, sans dommage ni déformation préjudiciable, les efforts mécaniques qui se produisent en usage normal.

8. Régulateur de charge/décharge

Les batteries sont des éléments sensibles qu'il convient de contrôler avec précautions afin d'éviter des

problèmes de fonctionnement et de durabilité. En ce sens, la tension des batteries est un paramètre prépondérant qu'il convient de contrôler aussi bien lors de la charge que pendant la décharge. Or, la tension fournie par les modules photovoltaïques est une grandeur fluctuante au gré des conditions climatiques. Par conséquent, il devient nécessaire d'intégrer un élément d'électronique de puissance permettant de gérer convenablement la charge et la décharge des batteries : c'est la fonction du régulateur de charge/décharge.

Le régulateur de charge /décharge doit être conforme aux normes :

- NF EN 62509 « Contrôleurs de charge de batteries pour systèmes photovoltaïques - Performance et fonctionnement » ;
- CEI 62109-1 « Sécurité des convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes photovoltaïques - Partie 1 : exigences générales ».

8.1. Types de régulateurs de charge/décharge

Les régulateurs de charge pour systèmes photovoltaïques d'éclairage public sont de deux types :

- Les régulateurs de charge PWM (Pulse Width Modulation) permettent juste d'adapter la tension des modules photovoltaïques à la tension de charge des batteries. Ils sont idéals pour les petites puissances photovoltaïques et en cas d'utilisation de modules photovoltaïques à 36 ou 72 cellules.
- Les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) utilisent un circuit spécial cherchant le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque pour charger les batteries avec le plus grand courant possible. Ils permettent d'obtenir jusqu'à 30% de rendement supplémentaire par rapport aux régulateurs PWM. Les régulateurs MPPT acceptent des tensions d'entrée élevées pouvant dépasser 250V et permettent ainsi de limiter la perte par effet joule. Ils sont adaptés à tous les types de modules photovoltaïques.

8.2. Caractéristiques des régulateurs charge/décharge

Les principales caractéristiques du régulateur charge/décharge sont :

- Plage de tension du générateur photovoltaïque admissible à l'entrée DC,
- Tension de fonctionnement du système : elle peut être de 12 V, 24 V. en fonction de la tension de la batterie,
- Gestion intelligente de l'état de charge de la batterie: seuil de charge, tension finale de charge, tension de charge rapide, tension limite pour la décharge profonde, tension de réenclenchement de la charge,
- Gestion du fonctionnement du luminaire avec toutes les protections nécessaires et/ou pilotage de puissance au niveau de la lampe LED, demi-puissance, paliers horaires...
- Courant de charge maximal : il doit être supérieur à la charge (luminaires),
- Suivi du point maximum de puissance MPPT ou PWM,
- Autoconsommation en fonctionnement et en stand-by,
- Rendement,
- Indice de protection : IP 22 si installé dans un coffre batteries en haut du mât et IP 65 si installé dans un coffre batterie au sol,
- Compatibilité avec batteries Gel,
- Protection contre les surtensions,
- Protection contre l'inversion de la polarité des modules photovoltaïques, de la batterie et de la charge,
- Protection contre les températures élevées,
- Protection contre les surintensités côté modules photovoltaïques, côté batterie et côté luminaires,
- Système de communication sur les performances et l'exploitation du système et l'état de la batterie,
- Garantie et service après-vente,
- Dimensions et poids,
- Certifications et rapports de test.

8.3. Critères de choix

En fonction du type du système d'éclairage et des exigences du client, les critères de choix sont à déterminer en se référant aux caractéristiques ci-dessus mentionnées.

Les régulateurs PWM ne sont acceptés qu'en cas d'utilisation de modules photovoltaïques de 36 ou 72 cellules.

9. Batterie

La batterie sert à stocker l'énergie électrique excédentaire produite par les modules photovoltaïques. Cette énergie est stockée sous forme chimique. La nuit, c'est la batterie qui fournit l'énergie. Le stockage est dimensionné pour satisfaire les besoins énergétiques durant la période maximale sans apport du champ photovoltaïque. Les batteries dans les systèmes photovoltaïques d'éclairage public doivent être de type étanche et sans entretien avec électrolyte gélifié (GEL)

Elles doivent être conformes aux normes :

- NF EN 61427 (C 58-427) « Accumulateurs pour les systèmes photovoltaïques (SPV) - Exigences générales et méthodes d'essais ».
- IEC 60896-21/22 « cycle de vie des accumulateurs ».

Leur mise en œuvre doit être conforme aux normes NF C 15-100 et NF EN 50272-2.

9.1. Composition

Quatre éléments sont indispensables pour le fonctionnement d'une batterie :

- L'électrode négative.
- L'électrode positive.
- L'électrolyte.
- Le séparateur en matière poreuse isolante ayant pour but d'éviter un court-circuit interne entre deux électrodes. En effet, pour des raisons d'encombrement et de réduction de la résistance interne, les plaques positives et négatives d'un accumulateur sont très proches les unes des autres.

9.2. Principe de fonctionnement

Lorsqu'on applique une source de tension continue aux bornes des plaques (électrodes) un courant s'établit créant une modification chimique des plaques et de l'électrolyte. Cette modification produit une différence de potentiel entre les deux plaques. Il est à noter que la circulation des électrons à l'intérieur de l'électrolyte est assurée grâce aux ions.

Durant la décharge les plaques positives subissent une «réduction» c'est à dire qu'elles consomment des électrons et les plaques négatives libèrent des électrons (réaction d'oxydation). Le phénomène inverse se produit pendant la charge.

9.3. Durée de vie de la batterie

La durée de vie dépend principalement de la profondeur de décharge journalière. Le nombre de cycles de la batterie en fonction de sa profondeur de charge et de la température de fonctionnement doit être fourni avec la fiche technique de la batterie.

9.4. Caractéristiques de la batterie

Les batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques d'éclairage public sont de type étanche et sans entretien avec électrolyte gélifié.

Les principales caractéristiques nécessaires à la détermination de la batterie sont :

- Capacité nominale : C'est la quantité maximale d'énergie que contient une batterie (sous température idéale de 25°). Elle s'exprime en Ampère heure (Ah) en C10, C20, C100.
- Profondeur de décharge (PDD) : C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie par rapport à la capacité nominale. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie.
- Tension nominale de l'élément : 6V ou 12V.
- Tension nominale de la batterie : C'est la tension de la batterie. Elle correspond aussi à la tension de fonctionnement. Ex : 12V, 24V.
- Taux de décharge : C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie.
- Taux d'autodécharge : c'est le taux moyen journalier d'autodécharge de la batterie.
- Taux de recharge : C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en une temps donnée (temps du taux de recharge).

- Cycle et durée de vie : C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.

D'autres caractéristiques sont aussi fournies par les fabricants telles que :

- La résistance interne en $m\Omega$,
- Le courant de court-circuit en A,
- Sa technologie Gel,
- Le nombre, le type et les caractéristiques des bornes,
- Le type et l'épaisseur des plaques positives,
- Le type et l'épaisseur des plaques négatives,
- Le type et les caractéristiques du séparateur,
- Le type et les caractéristiques de couvercle,
- Les dimensions et le poids, ...

9.5. Critères de choix

Les systèmes photovoltaïques autonomes d'éclairage public exigent des batteries qui peuvent être chargées pendant le jour et déchargées durant la nuit. Ces batteries doivent pouvoir fonctionner ainsi pendant des années sans détérioration remarquable de leurs caractéristiques, tout en satisfaisant la demande.

Les batteries utilisées dans les systèmes autonomes d'éclairage public sont de type étanche et sans entretien avec électrolyte gélifié. Elles doivent être :

- Résistance aux chocs et vibrations,
- Résistance aux décharges profondes,
- Résistance aux températures extrêmes (-10 / +55 C°),
- Performance excellente en cyclage,

En fonction des besoins électriques, de la zone et du lieu d'implantation et des exigences du client, les critères de choix sont à déterminer en se référant aux caractéristiques ci-dessus mentionnées.

10. Cablage des systèmes photovoltaïques pour l'éclairage public

10.1. Câbles

Le câblage est un élément important dans l'installation des systèmes photovoltaïques d'éclairage public et il doit être fait en respectant les règles de l'art et les normes techniques et de sécurité.

Les câbles électriques utilisés pour les installations photovoltaïques d'éclairage public doivent répondre à des critères spécifiques conformément aux normes et guides suivants :

- NF C 15-100 Installations électriques à basse tension,
- UTE C 32-502 Guide pour les câbles utilisés pour les systèmes photovoltaïques,
- Guide UTE C15-105 : installations électriques à basse tension.

Ils servent à acheminer le courant DC des modules photovoltaïques au régulateur de charge /décharge, et de ce dernier vers les batteries et les luminaires.

A. Types

Les câbles solaires sont de types mono-conducteur Cuivre à double isolation 1000V, de type C2 (non propagateur de la flamme), AN3 (Résistant au UV) et avec une température admissible sur l'âme d'au moins 90°C en régime permanent.

B. Caractéristiques

Le câble DC à utiliser doit avoir les caractéristiques techniques minimales suivantes :

- Unifilaire,
- AN3 : Résistant aux UV,
- Température permanente de l'âme 90°C minimum,
- Plage de température élevée (- 20 ° à + 100 °C),
- Tension de service selon branchement du champ PV (jusqu'à 1 000 V DC),
- Non propagateur de la flamme (C2 minimum)
- Résistivité : Cuivre $\rho_{70} = 1,25 \rho_0 = 0,02314 \Omega \cdot mm^2/m$ à 70°C

Les normes internationales (CEI 228) et françaises (NF C 32-013) retiennent quatre classes de souplesse :

- Classe 1 : âmes massives pour installations fixes
- Classe 2 : âmes rigides câblées ; nombre minimal de brins imposé (multibrins)
- Classe 5 : âmes souples pour installations mobiles (multibrins)
- Classe 6 : âmes extrasouples ; diamètre maximal des brins imposé (multibrins)

C. Critères de choix

Les principaux critères de choix des câbles en plus des caractéristiques ci-dessus mentionnées :

- Le courant admissible du câble doit être égal ou supérieur à 1,25 fois I_{scSTC} des modules photovoltaïques.
- Section à déterminer de façon à ce que la chute de tension maximale soit (pour réduire les pertes énergétiques) :
 - Inférieure à 1% entre les batteries et le régulateur de charge
 - Inférieure à 1 % entre les modules photovoltaïques et le régulateur de charge
 - Inférieure à 1 % entre régulateur de charge et les luminaires.
- Certifications.

10.2. Les connecteurs

Les connecteurs sont des accessoires qui permettent de connecter les câbles entre les modules photovoltaïques.

Les connecteurs doivent être conformes à la norme NF EN 50521.

A. Types

- Compatible MC4 simple ou double, mâle et femelle
- Compatible MC4 double mâle et femelle

B. Caractéristiques

Les connecteurs doivent avoir les caractéristiques minimales suivantes :

- Chaque couple mâle/femelle doit être de même marque et de même type,
- Sertissage avec un outil validé par le constructeur,
- Démontables avec un outil (par construction ou installation) si accessibles à des personnes non averties,
- Simplement enfichable (pas de raccord à vis, pas de soudure),
- Protection contre les contacts directs,
- Résistants aux UV,
- Indice de protection : IP 54 minimum.

C. Critères de choix

Selon leur usage, le choix des connecteurs doit prendre en considération les caractéristiques ci-dessus mentionnées.

11. Fusible de batterie

Le fusible de batterie est un fusible courant continu pour protéger l'installation, le parc de batteries et le régulateur de charge/décharge. Il est à utiliser avec son porte-fusible. Il doit être conforme aux exigences des normes CEI 60282-1 et NF EN 60269-6 (C 60-200-6).

A. Types

Les fusibles de batterie doivent être type ANL ou carré de type CF.

B. Caractéristiques

Le fusible de batterie doit :

- Être spécifié DC
- Avoir une intensité inférieure à I_{max} (valeur définie pour le dimensionnement thermique des câbles de batterie).

C. Critères de choix

Le choix du fusible de batterie doit tenir compte des caractéristiques ci-dessus mentionnées.

12. Portes fusibles

C'est un appareil électrique de protection capable d'ouvrir ou de fermer un circuit sous l'action manuelle d'un technicien afin d'isoler les circuits électriques d'alimentation.

Le sectionneur porte-fusibles a deux fonctions :

- La fonction consignation-isolément réalisée par le sectionneur.
- La fonction de protection par fusible.

Il doit être utilisé conformément aux exigences de la norme NF C 15-100.

Ce sont des supports de fusibles pour applications solaires. Ils doivent être conformes aux exigences des normes et standards suivants :

- DIN 43620
- NFC 60629, 63210, 63211, 63220
- EN 60947-1-3-5
- NF/EN 60269-1
- IEC 605289

A. Caractéristiques :

Le sectionneur porte-fusible doit au moins répondre aux exigences suivantes :

- Tenue au feu : 960 °C conformément à l'IEC 60695-2-1
- Résistance de court-circuit : conformément à l'IEC 60947-3
- Courant assigné de crête admissible : conformément à l'IEC 60269-1
- Degré de protection : IP 20 conformément à la norme IEC 60 529
- Température de fonctionnement minimale : -20 °C
- Température de fonctionnement maximale : 90 °C
- Avoir une capacité de coupure en kA plus grande que le courant de court-circuit de la batterie (I_{defaut_batterie}).

B. Critères de choix :

En fonction des fusibles à installer, le choix des portes fusibles DC doit tenir compte des caractéristiques ci-dessus mentionnées.

CONCEPTION & DIMENSIONNEMENT DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES D'ECLAIRAGE PUBLIC

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'éclairage public tient notamment compte de/du :

- La puissance du luminaire à installer ;
- Mode de gestion (éclairage constant – variable sur horloge et/ou détecteur...) ;
- La périodicité d'utilisation.

Ces conditions déterminent la quantité d'énergie à fournir chaque jour dans les conditions les plus défavorables. Cette quantité s'exprime en Wh/jour. Elle est le produit de la puissance du luminaire par le nombre d'heures de fonctionnement.

1. Définition du besoin électrique

1.1. Calculs des besoins électriques

Le calcul du besoin électrique est un travail préalable impactant le dimensionnement du générateur photovoltaïque et du parc de batteries.

Calculer les besoins électriques consiste à calculer l'énergie électrique journalière consommée par les luminaires. Ces besoins électriques s'expriment en Wh/jour (ou kWh/jour). Pour calculer les besoins électriques, il convient d'identifier le nombre des luminaires qui seront alimentés par le système d'éclairage public. Ensuite, une estimation de la durée d'utilisation journalière devra être effectuée. Le produit de la puissance électrique (en W) par le temps d'utilisation (en h) indiquera l'énergie journalière consommée (en Wh) par les luminaires. L'énergie consommée chaque jour peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$\text{Charge journalière} = \sum P(c) \cdot N \cdot T(c)$$

Avec :

N : Nombre de luminaires

T(c) : Nombre d'heures d'utilisation.

P(c) : Puissance appelée du luminaire

Le système d'éclairage peut être commandé pour minimiser sa consommation.

La charge journalière peut être calculée de la manière suivante :

$$\text{Charge journalière} = \sum (P(c) \cdot N \cdot T1(c)) + \sum P(c) \cdot R\% \cdot N \cdot T2(c)$$

Avec :

T1(c) : Nombre d'heures d'utilisation à pleine puissance du luminaire.

T2(c) : Nombre d'heures d'utilisation à puissance réduite du luminaire.

P(c) : Puissance appelée du luminaire.

R % : Pourcentage de réduction de la puissance du luminaire.

Pour le calcul des besoins électriques, se référer aux études de cas en annexe.

2. Evaluation du gisement solaire local

L'ensoleillement est habituellement exprimé en kWh/m².j .Pour déterminer l'énergie solaire disponible, il faut disposer de tables statistiques d'irradiations ou recourir à des logiciels reconnus (PVSYST, PVGIS...).

2.1. Angle d'inclinaison optimale

L'inclinaison optimale est celle qui permet de satisfaire les besoins lors du mois de décembre (mois le moins ensoleillé) soit 50° pour le cas de la Tunisie.

3. Performance d'une installation photovoltaïque d'éclairage public

3.1. Puissance crête et performances des modules

La puissance indiquée sur les fiches techniques des modules est celle déterminée dans les Conditions Standard de Test (STC : Standard Test Conditions) :

- Niveau d'éclairement $P_i = 1000 \text{ W/m}^2$,
- Température de cellule 25°C ,
- Coefficient Air Mass $AM = 1.5$.

La puissance du module diminue lorsque sa température augmente.

Cette variation de la puissance en fonction de la température se quantifie grâce au coefficient de température de la puissance $KT(P)$.

Technologie	Coefficient de température $KT(P)$
Silicium cristallin	De l'ordre de $-0.4/^\circ\text{C}$
Silicium amorphe	De l'ordre de $-0.1/^\circ\text{C}$
CIS ou CIGS	De l'ordre de $-0.2/^\circ\text{C}$

Cela signifie que, la puissance d'un module photovoltaïque à une température bien déterminée sera égale à $P(T) = P_{25^\circ\text{C}} \times \Delta T \times KT(P)$

$P(T)$: Puissance du module à la température réelle des cellules

$P_{25^\circ\text{C}}$: Puissance du module à la température des cellules égale à 25°C

ΔT : Température réelle des cellules -25°C

En plus de l'effet de la température, la pollution réduit considérablement l'énergie générée par les modules photovoltaïques, d'où l'intérêt de dépoussiérage périodique des modules surtout dans les régions exposées au vent du sable.

L'effet de la pollution pourrait engendrer une diminution de l'énergie produite par le module photovoltaïque pouvant dépasser 10% dans certaines régions du pays.

3.2. Rendement du régulateur

La fonction de régulation s'effectue avec un certain rendement. Ce rendement dépend de la technologie du régulateur :

Type du régulateur	η régulateur
PWM	Entre 95 % et 98 %
MPPT	Entre 90 % et 95 %, mais la fonction MPPT permet de profiter de la puissance maximale du champ photovoltaïque

3.3. Rendement des batteries

Le rendement d'une batterie est défini comme suit :

$$\eta_{\text{batterie}} = \frac{\text{(Quantité d'énergie restituée lors de la décharge)}}{\text{(Quantité d'énergie absorbée durant la charge)}}$$

Plusieurs phénomènes électrochimiques dégradent le rendement des batteries tels que :

- L'efficacité de la recharge, à savoir le rapport entre la capacité restituée et la capacité chargée (appelée également rendement faradique),
- Le phénomène lié à la loi de Peukert,
- L'autodécharge des batteries.

Le rendement moyen charge/décharge d'une batterie est de l'ordre de 85%

3.4. Calcul des pertes

Le calcul des pertes permet de déterminer les sections des câbles à utiliser.

A. Pertes par échauffement des câbles

L'électricité produite par les modules photovoltaïques doit être transportée jusqu'au luminaire. Ce transport s'effectue, par l'intermédiaire de câbles, avec des pertes d'énergie.

- Chute de tension régulière

Le calcul de la chute de tension est effectué dans les conditions suivantes :

- La résistivité du câble est celle correspondante à la température maximale de l'âme en service normal ($\rho = 1,25 \times \rho_0$) ;
- La tension de référence dans les calculs est la tension maximale de fonctionnement ;
- Le courant de référence dans les calculs est le courant maximal de fonctionnement ;
- La chute de tension doit être calculée pour chaque câble de chaîne PV, chaque câble de groupe PV et pour le câble principal PV.

$$u = 2 \times \rho \times \frac{L}{S} \times I_{mpp\ STC}$$

$$\Delta u \text{ (en \%)} = 100 \times u/U_A$$

Avec :

L est la longueur du câble (en mètre)

S est la section du câble (en mm²)

ρ est la résistivité du conducteur en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

La résistivité du conducteur est une donnée du fabricant et dépend du matériau :

Pour le Cuivre $\rho_{70} = 1,25 \rho_0 = 0,02314 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ à 70°C

La résistance du câble, définie ci-dessus, provoque une chute de potentiel entre le départ du câble et la fin du câble. Les chutes de tension maximales doivent être :

- Inférieure à 1% entre batterie et régulateur de charge
- Inférieure à 1% entre champ photovoltaïque et régulateur de charge
- Inférieure à 1 % entre régulateur de charge et les lampes

D. Autres pertes

D'autres pertes diverses peuvent faire baisser la performance de l'installation photovoltaïque. Il s'agit typiquement de :

- La disparité inévitable entre les cellules d'un module (théoriquement, toutes les cellules d'un module doivent être semblable électriquement),
- La tolérance en puissance des modules (La puissance crête annoncée sur les fiches techniques des modules est donnée à une tolérance positive pouvant atteindre 5 Wc, en général). Cette caractéristique des modules est un élément qualitatif important de l'installation.

3.5. Rendement global de l'installation photovoltaïque d'éclairage public

En tenant compte des différentes pertes citées ci-dessus, le rendement de l'installation photovoltaïque d'éclairage public à partir de l'énergie fournie par le générateur est donné par la formule suivante :

$$\eta = \eta_{\text{regulateur}} \cdot \eta_{\text{batterie}} \cdot (1 - \text{pertes})$$

En plus de ce rendement, il faut prendre en considération l'effet de la pollution et de la température du site sur le productible du générateur photovoltaïque d'une puissance crête bien déterminée tout en supposant que l'effet du mismatch (dispersion des caractéristiques des modules) est absorbé par la tolérance positive de la puissance crête réelle par rapport à celle mentionnée dans la fiche technique. Donc, en fonction de la saison et de la région de l'implantation, le rendement global de l'installation est à corriger par un coefficient allant de 0.8 (été, zone 3) à 1 (hiver, Zone 1).

Pour le dimensionnement du générateur photovoltaïque et des batteries, on répartit la Tunisie en trois zones :

- Zone1 (Z1) : Zone géographique composée par les gouvernorats de Kef, Jendouba, Béja, Siliana, Bizerte et Kasserine
- Zone2(Z2): Zone géographique composée par les gouvernorats du grand Tunis, Zaghouan, Nabeul, Sousse, Monastir, , Kairouan, Mahdia et Sfax
- Zone3 (Z3) : Zone géographique composée par les gouvernorats de Sidi Bouzid, Gafsa, Tozeur, Kébili, Médenine, Tataouine et Gabes.

Ainsi, le rendement global de l'installation calculée sur la base de la puissance crête des modules photovoltaïques varie entre $\eta_{\text{Global}} = \eta_{\text{et}} \eta_{\text{Global}} = 0.8\eta$.

La température maximale des modules photovoltaïques varie entre 60°C et 80°C

Zone géographique	Z1		Z2		Z3	
Saison	hiver	été	hiver	été	hiver	été
$\eta_{\text{Global}} =$ Température maximale du module	η 60°C	0.9 η 70°C	0.95 η 80°C	0.85 η	0.9 η	0.8 η

4. Dimensionnement du parc de batteries

Le dimensionnement du parc de batteries consiste à effectuer les deux choix techniques suivants :

- Choix de la tension de la batterie.
- Choix de la capacité de la batterie.

4.1. Choix de la tension du parc de batteries

Le choix de la tension de la batterie dépend de la tension de sortie du régulateur et de la tension de fonctionnement des luminaires.

4.2. Choix de la capacité du parc de batteries

Avant de calculer la capacité des batteries, le concepteur doit définir l'autonomie de réserve, qui correspond au nombre souhaité de jours pendant lesquels le parc de batteries est capable d'alimenter, sans ensoleillement, les besoins d'éclairage. Le choix de l'autonomie, dépend des conditions climatiques du site, et plus particulièrement du nombre de jours consécutif sans production photovoltaïque.

L'autonomie de la batterie est définie en fonction de la région. Les valeurs d'autonomie minimales suivantes sont recommandées :

- 03 jours pour la Z1
- 02 jours pour la Z2 et Z3

La capacité du parc des batteries est alors calculée de la manière suivante :

$$C \text{ (Ah)} = \frac{(\text{charge journalière} \cdot \text{autonomie})}{(\text{U}_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{batterie}} \cdot \eta_{\text{régulateur}} \cdot (1 - \text{pertes}) \cdot \text{coef de décharge profonde})}$$

La capacité du parc de batteries calculée est en C_{100}

U_{bat} correspondent à la tension de fonctionnement du système.

La capacité de la batterie doit être assurée par au maximum deux éléments montés en parallèle.

Pour le cas de la Tunisie, la capacité de la batterie retenue doit être supérieure à celle calculée en hiver.

Pour le dimensionnement du système photovoltaïque autonome d'éclairage public et en plus du dimensionnement manuel ci-dessus mentionné, il faut justifier les résultats de dimensionnement à l'aide d'un logiciel reconnu tel que le PV-Sol, RETSCREEN, PVSyst,...

5. Puissance crête du générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque doit être d'une puissance suffisante pour assurer la charge de la batterie envisagée en tenant compte de son autonomie et pour le bon fonctionnement des luminaires et en tenant compte de toutes les pertes du système.

Le système photovoltaïque sera dimensionné pour assurer le fonctionnement de l'éclairage sans interruption toute la nuit et particulièrement durant la période hivernale.

L'installateur doit fournir avec les notes de calculs énergétiques, un tableau indiquant la production moyenne d'électricité journalière et mensuelle (en kWh) du générateur photovoltaïque, en tenant compte des données météorologiques du site.

Les notes de calculs doivent apparaître clairement le pourcentage des pertes dues à la température, aux effets de la réflectance angulaire, et autres pertes (câbles de raccordement et de connexion, batterie, régulateurs,... etc).

L'évaluation du gisement solaire et la quantification des diverses pertes et des rendements des composants permettent, à partir de ce qui précède, de calculer le productible de l'installation photovoltaïque d'éclairage public.

La puissance crête du générateur photovoltaïque d'une installation d'éclairage public se détermine de la façon suivante :

$$P_c = \frac{\text{charge journalière}}{(\eta_{\text{Global}} \cdot E_i)}$$

Avec :

- P_c est la puissance crête du générateur photovoltaïque.
- E_i est l'irradiation solaire journalière reçue par une surface unitaire (1 m²) du champ photovoltaïque, en prenant en compte l'orientation et l'inclinaison de celui-ci.

En fonction de la durée d'éclairage souhaitée, il est recommandé de déterminer la puissance crête pendant le mois de décembre vu le nombre élevé d'heures d'éclairage et le faible ensoleillement pendant cette période.

6. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Pour déterminer un nombre provisoire de modules, il faut diviser la puissance crête totale du générateur photovoltaïque par la puissance crête du module solaire choisi.

Le nombre provisoire de modules est un nombre entier qui se calcule donc de la façon suivante :

$$\text{Nombre provisoire de modules} = \frac{(\text{Puissance totale (Wc)})}{(\text{Puissance d'un module (Wc)})}$$

7. Choix du régulateur de charge/décharge

Le régulateur de charge/décharge, pièce centrale de l'installation, doit être compatible avec les autres éléments (générateur photovoltaïque et parc de batteries).

Le choix du régulateur s'effectue selon les critères suivants.

- L'intensité maximale admissible par le circuit d'entrée du régulateur : doit être supérieure à la somme des courants de court-circuit des modules photovoltaïques montés en parallèle à T_{max} .
- L'intensité admissible du courant de sortie du régulateur : doit être supérieure à la valeur maximale appelée par les luminaires. Le courant maximum appelé par les luminaires pendant une heure doit être inférieur à 10% de la capacité de la batterie.
- Courant de charge : celui qui permet de charger la batterie
- La plage de tension d'entrée : la tension à circuit ouvert délivrée par le générateur photovoltaïque à -10°C
- La tension de sortie : tension du parc de batteries et de fonctionnement des luminaires
- Equipé d'un système de timing et de fonctionnement automatique en fonction de l'éclairement.

8. Dimensionnement des câbles DC

Le choix de la section des câbles de polarité DC s'effectue selon deux critères majeurs :

- Le courant admissible I_Z dans le câble,
- La chute de tension admissible dans le câble,
- Les facteurs classiques multiplicatifs de correction en courant (coefficient de mode de pose, coefficient prenant en compte le nombre de câbles posés ensemble, coefficient tenant compte de la température ambiante et du type de câble).

8.1. Courant admissible des câbles DC

Le dimensionnement des câbles est à effectuer conformément aux règles de la norme NFC15-100 et du guide UTE C15-105 sur la base de câbles à isolation PR, pour des courants maximums susceptibles de les traverser y compris en cas de défaut.

En fonctionnement normal, le courant maximal d'emploi, côté générateur photovoltaïque, doit être pris égal à $1,25 \times ISC$. Ainsi, on choisira toujours des sections de câbles dont le courant admissible I_z supérieur à $1,25 \times ISC$.

Le courant admissible d'un câble est la valeur maximale de l'intensité du courant pouvant parcourir en permanence ce conducteur sans que sa température soit supérieure à sa température spécifiée.

8.2. Chute de tension dans la partie DC

L'optimisation technico-économique conduit à réduire au maximum les chutes de tension dans la partie DC d'une installation photovoltaïque d'éclairage public.

A une valeur de courant égal à I_{mppSTC} (STC : conditions d'essais normalisées), Les chutes de tension ΔU maximales doivent être :

- Inférieure à 1% entre le parc de batteries et le régulateur de charge
- Inférieure à 1% entre générateur photovoltaïque et le régulateur de charge
- Inférieure à 1 % entre régulateur de charge et les luminaires

Avec $\Delta U = (\rho L/S) \times I$

- L : Longueur du câble (en mètre)
- S : Section du câble (en mm^2)
- ρ : Résistivité du conducteur en $\Omega \cdot mm^2/m$

9. Notes de calcul

L'installateur est appelé à effectuer la note de calcul de la partie mécanique du système d'éclairage public photovoltaïque (mât, crosse, coffre à batterie et support module)

La note de calcul doit être réalisée par un bureau spécialisé dans les études des structures et conformément aux normes suivantes :

- CM66 : Règles de calcul des constructions en acier
- NFE25.007 : Éléments de fixation - Conditions de commande et de livraison.
- NFE25.812 : Boulonnerie de construction à haute résistance apte à la précontrainte -système HRC - Boulons à précontrainte calibrée et sa mise à jour
- EN10025 : Produits laminés à chaud en aciers de construction
- NFP22.411-22.431-22.462-22.470-22.471-22.800 Construction métallique- Assemblages rivés - Exécution des assemblages
- Eurocode 9 : Calcul des structures en alliages d'aluminium
- AL76 : Règles de conception et de calcul des charpentes en alliages d'aluminium
- EN 1090-2+ A1 Exécution des structures en acier et des structures en aluminium - Partie 2 : exigences techniques pour les structures en acier
- NF EN1999 : Calcul des structures en aluminium
- Règles « Neige Vent » NV65 et annexes
- Règles « Constructions Métalliques CM66
- Règles BAEL 91
- Fascicule 62 titre V : Calcul et conception des fondations des ouvrages de génie civil
- Norme EN 40 et Marquage CE : Obligations réglementaires et recommandations de pose

Lors du calcul des ouvrages, nous retenons les hypothèses suivantes :

- Site exposé
- Contrainte admissible du sol support (minimale) égale à 1,5 bars.

INSTALLATION ET MISE EN SERVICE DES PHOTOVOLTAÏQUES D'ÉCLAIRAGE PUBLIC

1. Choix de l'emplacement du système d'éclairage public

Le choix de l'emplacement des systèmes photovoltaïques d'éclairage public est dicté par les exigences relatives à l'uniformité et au niveau de l'éclairement.

L'orientation du module doit être vers le plein Sud (Azimut 0°)

L'inclinaison (ou la pente) est l'angle que fait le module avec l'horizontale. L'inclinaison du module peut être déterminée :

- A l'aide d'une boussole.
- A l'aide d'une boussole, un gabarit et un niveau.
- A l'aide d'un inclinomètre (instrument de mesure d'une pente).

Il est recommandé de respecter l'inclinaison déterminée pour optimiser le fonctionnement du système d'éclairage public à savoir 50°.

2. Mise en œuvre des massifs des candélabres

Les dimensions des massifs seront déterminées par note de calcul basée sur la formule d'ANDREE NORSA et présentée en fonction du type du candélabre, du coefficient de butée du terrain, des équipements à installer ainsi que les conditions météorologiques du site.

La composition du béton employé pour la confection des massifs est celle fixée comme suit :

- 350 kg de ciment pour 400 litres de sable et 800 litres de gravillons 15/25

Les tiges de scellement devant être noyées dans le béton et fixées solidement sur un cadre amovible, afin de maintenir leur écartement à l'entraxe des trous de fixation de la semelle du candélabre. Elles ne doivent pas dépasser le massif de plus de 8cm. Les tiges de scellement des mâts seront placées dans le béton frais. Il est absolument interdit de faire des trous dans le béton durci.

Chaque tige de scellement doit être munie d'un écrou, d'un contre-écrou et deux rondelles de diamètres appropriés pour assurer un serrage efficace du candélabre.

La face supérieure du massif est à concevoir de façon à permettre l'écoulement de l'eau vers l'extérieur (bombage de la face supérieure) et à protéger les pieds des candélabres et les goussets d'attache.

Afin d'éviter des accidents, le béton sera coulé aussitôt la fouille achevée. Les fouilles pour massifs d'ancrage des mâts sont à exécuter aux dimensions de ces massifs, les parois des fouilles servant de coffrage pour le béton en même temps que de butée.

3. Pose des mats et crosses

Les mâts devront être verticaux et rigoureusement alignés suivant l'axe de la route.

Leur implantation fera l'objet d'un soin particulier, l'inter-distance est à respecter, à plus ou moins trois pour cent ($\pm 3\%$).

Avant levage, ils ne seront équipés d'aucun équipement. Ni luminaire, ni module PV, ni batterie, ni régulateur de charge/décharge.

Toutes les précautions devront être prises pour éviter la détérioration de la protection contre la corrosion, pendant la manutention. Si malgré cela la protection était détériorée, il appartiendrait à l'entreprise d'exécuter les retouches durables nécessaires.

La crosse doit être emboîtée sur le mât et fixée au moyen de huit vis de serrage.

Les écrous devront être bloqués à fond avant de serrer les contre-écrous. L'ensemble tige-écrou, contre-écrou, sera protégé par une coulée de compound. La verticalité des fûts sera vérifiée mât par mât.

Le repérage de la verticalité sera fait avec des rondelles ou des cales d'acier placées sous l'embase avec remplissage au mortier.

On distingue plusieurs types d'implantations des mâts où interviennent la largeur de voie et hauteur de feu :

- Implantation unilatérale : Ce type d'implantation n'est recommandée que dans le cas où la largeur de chaussée est voisine ou inférieure à la hauteur de feu ;
- Implantation bilatérale en quinconce : C'est le cas où la largeur de chaussée reste inférieure à une fois et demi la hauteur de feu. Il faut veiller à éviter l'effet désagréable de serpentement. Ce type d'implantation devra donc être évité dans les courbes ;
- Implantation bilatérale vis-à-vis : Ce type d'implantation intervient lorsque la largeur de chaussée est supérieure à une fois et demi la hauteur de feu ;
- Implantation axiale : Dans le cas des implantations des lampadaires sur une double voie avec terrain plein central.

4. Implantation du support modules

La mise en œuvre de la structure porteuse des modules doit respecter les normes appliquées et doit respecter les recommandations suivantes :

- La structure doit résister, avec les modules installés, aux surcharges du vent et à la neige, en accord avec les résultats des notes de calcul ;
- La conception et la construction de la structure doit permettre les dilatations thermiques nécessaires, sans charges de transmission qui peuvent affecter l'intégrité des modules, selon les indications du fabricant ;
- La structure supportant les modules doit être, en acier galvanisé à chaud, en aluminium anodisé ou en acier inoxydable ;
- Les boulons, les rondelles et écrous seront de dimension adéquate en inox ;
- Les éléments de fixation des modules et leurs propres structures ne doivent pas créer des zones d'ombre sur les modules photovoltaïques.

5. Fixation des modules

Les modules photovoltaïques sont fixés par des rails supports de module et sont pressés contre les rails à l'aide de pince, de préférence dans la zone des quarts.

Les pinces doivent reposer suffisamment sur le cadre du module, conformément aux indications du fabricant.

Suivant les recommandations du fabricant des modules il est possible de fixer ces derniers avec des boulons écrous de dimension adéquate, généralement spécifiés par le fabricant, et dans ce cas tous les trous de fixation doivent être utilisés.

Pour les modules photovoltaïques sans cadre, les pinces de fixation sont plus larges et sont munis d'inserts en EPDM (Caoutchoucs en éthylène-propylène-diène monomère). Ces pinces doivent être certifiées par le fabricant des modules.

Sauf indication contraire du fabricant du module photovoltaïque, les modules photovoltaïques peuvent être posés en portrait ou en paysage

6. Pose des luminaires a led

Les luminaires seront montés après pose et calage des mâts. Elles devront être parfaitement ajustées, l'horizontalité transversale étant contrôlée au niveau à bulle.

Les luminaires devront être disposés de manière correcte par rapport aux surfaces à éclairer de façon à obtenir la meilleure uniformité de luminance possible. Ils devront être manipulés avec le plus grand soin, afin d'éviter toute dégradation. Leur fixation à la crosse devra être effectuée sans jeu.

7. Installation du regulateur de charge/decharge

Le régulateur doit être installé dans le coffre à batterie et au niveau de la partie haute.

La polarité doit être respectée lors du branchement des différents composants.

Les différents composants sont à brancher aux bornes du régulateur dans l'ordre suivant:

1. Batteries
2. Générateur photovoltaïque
3. Luminaires

Les différentes composantes doivent être débranchées dans l'ordre suivant :

1. Luminaires
2. Générateur photovoltaïque
3. Batteries

Après la connexion,

- Vérifier les indicateurs de régulateur de charges afin d'identifier les anomalies possibles dans le fonctionnement.
- Si aucune indication ne confirme le fonctionnement du régulateur de charge, vérifier que les connexions ont été bien réalisées sans aucun défaut.

8. Installation des batteries

Les batteries doivent être placées dans un coffre résistant à l'acide et placées en haut du mât ou au sol selon les exigences du client.

8.1. Principes à respecter pour les groupements des batteries :

A. Les batteries à monter en série doivent :

- Etre de même type (fabrication),
- Avoir les mêmes capacités (Ah),
- Avoir une densité d'électrolyte égale (état de charge égal).

B. Les batteries à monter en parallèle doivent :

- Etre de même type (fabrication),
- Avoir la même tension nominale,
- Avoir la même capacité nominale
- Avoir une densité d'électrolyte égale (état de charge égal).

Le nombre maximum de batteries branchées en parallèle ne doit pas dépasser deux.

Le câblage des éléments de batteries ne pouvant s'effectuer hors tension, il convient de respecter scrupuleusement les règles de sécurité.

Il convient d'apporter une attention toute particulière lors de la manipulation d'éléments

Il est impératif d'utiliser les matériels de sécurité préconisés dans les notices d'installations des fabricants de batteries

En cas d'installation de deux rangées parallèles de batteries, il faut amener séparément chaque câble de chaque rangée de batteries vers deux bus bar (barre en cuivre) et éviter d'empiler les cosses sur les bornes pour établir les connexions. Cela permet de réduire la corrosion et permet de créer une symétrie électrique.

9. Cablage

9.1. Câbles DC

Les câbles DC d'une installation photovoltaïque d'éclairage public doivent :

- Etre protégés des conditions climatiques sévères et des rayonnements UV afin de ralentir le processus de vieillissement et à minimiser les risques de point chaud et d'arc.
- Cheminer derrière les modules photovoltaïques et résister à une température ambiante de T_{max}. ils doivent être acheminés dans des fourreaux métalliques.
- Etre posés sans contact avec des arrêtes tranchantes pour éviter les dommages mécaniques ; des protections contre les risques de cisaillement devront être installées aux endroits à risques.
- Etre choisis et mis en œuvre de manière à réduire au maximum le risque de court-circuit ; cette condition est assurée en utilisant des câbles mono-conducteurs d'isolement équivalent à la classe II (isolation double).
- Respecter les rayons de courbure minimaux. Etre posés et protégés en utilisant des matériels de fixation et de protection appropriés.
- Toutes les connexions doivent être correctement terminées en utilisant les outillages spécifiques.

- Aucune connexion de fils nus à la borne n'est autorisée. Le câble doit se terminer par un accessoire de câblage approprié,
- Les câbles doivent être dimensionnés en tenant compte des chutes de tension.

Le passage des câbles au niveau du coffre à batterie doit se faire par le biais de presse étoupe.

Tout le câblage dans le coffre de la batterie / régulateur doit être :

- Correctement étiqueté pour chaque fonction
- Correctement fixé à l'aide des attaches, le cas échéant

9.2. Usage des connecteurs

Pour garantir la qualité de la connexion et limiter les risques d'arc électrique pouvant créer des incendies, chaque couple de connecteurs mâle-femelle à assembler doit être de même type et même marque.

Les connecteurs devront être compatibles MC4, adaptés à la section des câbles, conformes à la norme NF EN 50521. Leur sertissage devra être réalisé conformément aux préconisations du fabricant et avec le matériel à sertir adapté.

10. Signalisation

Les principaux composants constituant l'installation photovoltaïque d'éclairage public devront être identifiés et repérés par des étiquettes facilement visibles et fixées d'une manière durable en correspondance avec les plans et schémas de l'installation :

- Câbles DC (tenant et aboutissant avec repérage des polarités pour les câbles DC) ;
- Batteries ;
- Régulateur ;
- Modules photovoltaïques

11. Mise en services

11.1. Inspection visuelle

Avant la mise en service d'une installation photovoltaïque autonome, une inspection visuelle de tous les composants et de leur fixation et serrage est à effectuer comme suit :

A. Mât :

- Intégrité et emplacement
- Fixation
- Fondation et génie civil

B. Modules

- Propres,
- Pincés bien serrés,
- Installation robuste et intacte,
- Câbles et connecteurs bien fixés,
- Alignement respecté, aucun module tordu.

C. Batterie

- L'intégrité du lieu d'installation,
- L'aération du lieu d'installation (si batterie ouverte),
- Coffre à batterie existant,
- Les connexions sont bien serrées,
- Les connexions correspondent à la tension du système,
- L'intégrité des câbles,
- Fusible de batterie de calibre adéquat et installé correctement.

D. Régulateur de charge/décharge

- Installé selon manuel
- Polarité respectée
- Tension et courant approprié

E. Câbles

- Sections et types de câbles respectés
- L'intégrité
- Fixation
- Protection mécanique

F. Connecteurs

- L'intégrité
- Placement
- Sertissage

11.2. Mesures

Pour effectuer les mesures nécessaires avant la mise en œuvre d'un système photovoltaïque d'éclairage public, il faut disposer des équipements de mesures nécessaires (multimètre, pince ampèremétrique, boussole, densimètre, luxmètre...)

Les principales mesures à effectuer sont :

A. Modules / chaînes

- UOC [V]
- ISC [A]
- Polarité CC

B. Câbles d'alimentation en DC

- Chute de tension

C. Batterie

- Tension au repos U [V], l'heure, l'irradiation
- Courant de charge I [A], l'heure, l'irradiation
- Densité de l'électrolyte
- Température

D. Le régulateur de charge

- Courant d'entrée (PV),
- Courant à la sortie en fonction de l'état de charge de la batterie et de l'irradiation,
- Courant de sortie DC en fonction de la puissance appelée,
- Tension d'entrée (PV)
- Tension de charge
- Tension de sortie (DC)

E. Luminaires

- Tension d'entrée DC,
- Courant d'entrée,
- Flux lumineux,
- Uniformité moyenne d'éclairement.

12. DOSSIER TECHNIQUE

L'installateur doit fournir, après l'achèvement des travaux, un dossier technique. Ce dossier technique doit comporter les éléments suivants :

- Un schéma électrique unifilaire du système photovoltaïque d'éclairage public.
- La nomenclature des équipements installés mentionnant les caractéristiques et les références.
- Une description de la procédure d'intervention sur l'installation photovoltaïque d'éclairage public et consignes de sécurité.
- Un projet de contrat de maintenance à signer avec le client.
- Note de calcul de la partie mécanique du système d'éclairage public photovoltaïque (mât, supports modules, coffre batterie, crosse, ...).

MAINTENANCE ET EXPLOITATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE D'ECLAIRAGE PUBLIC

La durabilité du système photovoltaïque d'éclairage public ne peut être pleinement assurée que si l'installation photovoltaïque est entretenue, et son usage est normal.

Une installation photovoltaïque d'éclairage public doit faire l'objet d'un entretien et d'une maintenance régulière. Il est préconisé de réaliser les opérations associées à cette maintenance au minimum une fois par an. Ces opérations, par leur technicité et le danger inhérent à la manipulation de l'installation photovoltaïque d'éclairage public, sont à effectuer par des intervenants formés et habilités.

1. Entretien et maintenance

La durée de vie d'une installation photovoltaïque d'éclairage public dépend directement du soin qui sera apporté à l'entretien et à la maintenance périodique de ses composants.

1.1. Types de maintenance et périodicité

On distinguera les trois types de maintenance suivants correspondant aux opérations de :

- Maintenance conditionnelle, basées sur une surveillance des paramètres significatifs de l'installation ;
- Maintenance prévisionnelle, exécutées en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation des paramètres significatifs de la dégradation du bien (ex. : corrosion) ;
- Maintenance systématique, exécutées à des intervalles de temps préétablis et sans contrôle préalable de l'état du bien ni de ses éléments constitutifs ; la périodicité recommandée est d'un an.

Lors des visites de maintenance, les opérations suivantes sont à assurer systématiquement :

- Contrôle visuel de l'ensemble des parties accessibles de l'installation ;
- Vérification de la fixation et du serrage des différents composants ;
- Vérification de l'état des batteries ;
- Vérification de l'absence de corrosion ;
- Contrôle visuel de l'état des câbles ;
- Contrôle visuel des connexions ;
- Contrôle visuel des caractéristiques techniques du régulateur et des luminaires ;
- Contrôle de la présence et du bon état de l'identification des composants
- Contrôle de la présence et du bon état de l'étiquetage
- Nettoyage des modules photovoltaïques
- Vérification de l'état de charge des éléments de la batterie
- Vérification du fonctionnement du régulateur
- Vérification du maintien des conditions initiales de l'environnement du système d'éclairage public ;
- Vérification du maintien des conditions d'exploitation et du maintien de la configuration initiale

1.2. Sécurité de l'intervention sur une installation photovoltaïque d'éclairage public

Risque du courant continu

La vérification des performances des systèmes photovoltaïques d'éclairage public se fait en hauteur. Il faut donc être doté des moyens nécessaires.

Risque du courant continu

Le courant continu est dangereux pour le corps humain : à faible intensité, il provoque des désordres électrochimiques qui peuvent entraîner la mort et, à haute intensité, il provoque des brûlures très dangereuses. Les installations fonctionnant à moins de 50 V ne représentent pas de grand danger. Dès 120 V, il faut prévoir des mesures de protection spéciales par des agents habilités.

Habilitation du personnel

Le personnel intervenant sur l'installation photovoltaïque d'éclairage public doit être formé et habilité pour les travaux en hauteur d'électricité. La tension de sortie des modules photovoltaïques peut rapidement devenir dangereuse (choc électrique potentiellement mortel à partir de 60 V en courant continu, ce niveau de tension pouvant être atteint dès la mise en série de deux modules photovoltaïques).

Les intervenants doivent disposer de l'habilitation électrique concernée, selon la norme NF C 18-510 (habilitation symbole BP ou habilitation symbole BR « photovoltaïque »). Une dispense d'habilitation électrique n'est autorisée que pour certaines opérations spécifiquement décrites dans la norme NF

C 18-510 (notamment l'interconnexion de modules à l'aide de connecteurs débrochables conformes à la norme NF EN 50521 sur une chaîne de tension à vide inférieure ou égale à 60 V en courant continu).

Les intervenants non habilités à effectuer les raccordements électriques ou à travailler en hauteur et à proximité de pièces nues sous tension ne doivent pas être amenés à effectuer des opérations de maintenance. En cours de chantier, des signalisations mises en place par le personnel électricien indiquent à tout intervenant extérieur le danger lié à la zone de travail.

2. Contrat de maintenance

Un contrat de maintenance est à signer entre l'installateur et le client de l'installation photovoltaïque d'éclairage public. Ce contrat doit spécifier au moins les éléments suivants :

- Aspects couverts par le contrat de maintenance et engagements des deux parties
- Les conditions et modalités d'exploitation de l'installation photovoltaïque
- Nombre de visites de maintenance préventive par an et leurs périodes
- Délais d'intervention après la réception de la réclamation des pannes
- Qualification de l'équipe intervenante
- Documents à remplir lors des interventions
- Durée du contrat
- Tarifs des interventions, leur mise à jour et modalités de paiement
- Les garanties des équipements et des interventions
- Dispositions particulières et règlement des conflits

ANNEXE : ETUDES DE CAS

DIMENSIONNEMENT D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE D'ECLAIRAGE PUBLIC

PREMIER CAS

Le système d'éclairage est composé d'une lampe de puissance 60 W

La lampe fonctionne à pleine puissance pendant les cinq premières heures. Une réduction de 50% de la puissance est commandée pour le reste de la nuit.

1. Calcul des besoins électriques

$$\text{Charge journalière} = \sum (P(c) \cdot N \cdot T1(c)) + \sum P(c) \cdot R\% \cdot N \cdot T2(c)$$

Avec :

T1(c) : Nombre d'heures d'utilisation à pleine puissance du luminaire.

T2(c) : Nombre d'heures d'utilisation à puissance réduite du luminaire

P(c) : Puissance appelée du luminaire

R% : Pourcentage de réduction de la puissance du luminaire

Pour une lampe de 60 W, la puissance appelée étant de 72W. La charge journalière moyenne est présentée au tableau suivant :

Nbre heures de fct	13,7	12,9	11,7	10,5	9,7	9,1	9,4	10,2	11,3	12,45	13,5	13,7
Besoin journalier moyen (Wh)												
Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUI	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
Besoin moyen (Wh)	673,2	644,4	601,2	558	529,2	507,6	518,4	547,2	586,8	628,2	666	673,2

2 Evaluation du gisement solaire local

2.1. Angle d'inclinaison optimale

L'inclinaison optimale est celle qui permet de satisfaire les besoins lors du mois de décembre (mois le moins ensoleillé) soit 50° pour le cas de la Tunisie.

2.2. Rendement global de l'installation photovoltaïque d'éclairage public

$$\eta = \eta_{\text{regulateur}} \cdot \eta_{\text{batterie}} \cdot (1 - \text{pertes}) = 0,78$$

Un coefficient de correction est adopté suivant les zones et la saison comme suit :

Zone géographique	Z1		Z2		Z3	
Saison	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
$\eta_{\text{Global}} =$	η	0.9η	0.95η	0.85η	0.9η	0.8η

Ainsi le rendement global de l'installation est de 74,4 % au mois de Décembre et 66.5% au mois d'Aout. (Tunis, Zone Z2).

2.3. Puissance crête du générateur photovoltaïque

La puissance crête est donnée par la formule suivante :

$$P_c = \frac{\text{charge journalière}}{(\eta_{\text{Global}} \cdot E_i)}$$

Avec :

- PC est la puissance crête du générateur photovoltaïque.
- Ei est l'irradiation solaire journalière reçue par une surface unitaire (1 m²) du champ photovoltaïque, en prenant en compte l'orientation et l'inclinaison de celui-ci.

La puissance crête calculée pour les mois de Décembre et d'Aout est la suivante :

	Décembre	Août
Puissance crête (kWc)	0,211	0,125

La puissance à installer est alors de 211Wc.

2.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque

On choisit un module de 260Wc

Le générateur photovoltaïque est alors composé d'un module

3. Dimensionnement du parc de batteries

3.1. Choix de la tension du parc de batteries

Le choix de la tension de la batterie dépend de la tension de sortie du régulateur et de la tension de fonctionnement des lampes. Elle est alors de 24 V

3.2. Choix de la capacité du parc de batteries

Le nombre minimal d'autonomie de la batterie est :

- 03 jours pour la Z1
- 02 jours pour la Z2 et Z3

Le client est à Tunis (Zone 2),

La capacité du parc des batteries est calculée de la manière suivante :

$$C \text{ (Ah)} = \frac{\text{charge journalière} \cdot \text{autonomie}}{U_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{batterie}} \cdot \eta_{\text{régulateur}} \cdot (1 - \text{pertes}) \cdot \text{coef de décharge profonde}}$$

La capacité du parc de batteries calculée pour les mois de Décembre et Aout est la suivante :

	Décembre	Août
Capacité Batterie (Ah)	132	107,3

On opte pour une batterie 12V, avec une capacité supérieure à 132 Ah en C100

Le parc de batterie est ainsi composé de deux batteries en série

4. Choix du régulateur de charge/décharge

Le générateur photovoltaïque est composé d'un module dont les caractéristiques suivantes :

Puissance du module (kWc)	0,260
Uoc STC (V)	37,800
Uoc (-10°C) (V)	41,921
Isc STC (A)	9,070
Isc (Tmax) (A)	9,347

Le choix du régulateur s'effectue selon les critères suivants.

- L'intensité maximale admissible par le circuit d'entrée du régulateur : doit être supérieure à la somme des courants de court-circuit des modules photovoltaïques montés en parallèle à T_{max}.
- L'intensité admissible du courant de sortie du régulateur qui doit être supérieure à la valeur maximale appelée par les récepteurs DC. Le courant maximum appelé par les charges DC pendant une heure doit être inférieur à 10% de la capacité de la batterie.
- Courant de charge : celui qui permet de charger la batterie.
- La plage de tension d'entrée : la tension à circuit ouvert délivrée par le générateur photovoltaïque à -10°C.
- La tension de sortie : 24 V

On choisit un régulateur MPPT avec les caractéristiques suivantes : U_{DCmax}= 55V, I_{max}= 10A

5. Dimensionnement des câbles DC

Les chutes de tension ΔU maximales doivent être :

- Inférieure à 1 % entre la batterie et le régulateur de charge
- Inférieure à 1 % entre le champ photovoltaïque et le régulateur de charge
- Inférieure à 1 % entre le régulateur de charge et le luminaire

Avec $\Delta U = (\rho L/S) \times I$

L : Longueur du câble (en mètre)

S : Section du câble (en mm²)

ρ : Résistivité du conducteur en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

- Résistivité $r = 0.023 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ - U ₁ = 31.7 V - Nombre de modules par chaîne = 1 - Nombre de chaînes= 1 - La longueur du câble DC est 2 fois la distance (m)	DC	Distance (m)	section (mm ²)	intensité (A)	R (Ω)	$\Delta U / U$ (V)
	Module-Régulateur	3	6	8,7	0,012	0,63%
	Régulateur-Batterie	5	10	10	0,012	0,96%
	Régulateur-lampe	2	10	2,5	0,005	0,10%
	$\Delta U/U$ Total (%)					1,69%

DEUXIÈME CAS

Le système d'éclairage est composé de deux lampes de Puissance 60 W chacune

Les lampes fonctionnent à pleine puissance pendant les cinq premières heures. Une réduction de 50% de la puissance est commandée pour le reste de la nuit.

1. Calcul des besoins électriques

$$\text{Charge journalière} = \sum (P(c) \cdot N \cdot T1(c)) + \sum P(c) \cdot R\% \cdot N \cdot T2(c)$$

Avec :

T1(c) : Nombre d'heures d'utilisation à pleine puissance du luminaire.

T2(c) : Nombre d'heures d'utilisation à puissance réduite du luminaire

P(c) : Puissance appelée du luminaire

R% : Pourcentage de réduction de la puissance du luminaire

La charge journalière moyenne est présentée au tableau suivant :

Durée de Fc (h)	13,7	12,9	11,7	10,5	9,7	9,1	9,4	10,2	11,3	12,45	13,5	13,7
Besoin journalier moyen (Wh)												
Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	AMI	JUIN	JUL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
Besoin moyen (Wh)	1033,2	1004,4	961,2	918	889,2	867,6	878,4	907,2	946,8	988,2	1026	1033,2

2. Evaluation du gisement solaire local

2.1. Angle d'inclinaison optimale

L'inclinaison optimale est celle qui permet de satisfaire les besoins lors du mois de décembre (mois le moins ensoleillé) soit 50° pour le cas de la Tunisie.

2.2. Rendement global de l'installation photovoltaïque d'éclairage public

$$\eta = \eta_{\text{regulateur}} \cdot \eta_{\text{batterie}} \cdot (1 - \text{pertes}) = 0,78$$

Un coefficient de correction est adopté suivant les zones et la saison comme suit :

Zone géographique	Z1		Z2		Z3	
Saison	Hiver	Eté	Hiver	Eté	Hiver	Eté
$\eta_{\text{Global}} =$	η	0.9η	0.95η	0.85η	0.9η	0.8η

Ainsi le rendement global de l'installation est de 76.7% au mois de Décembre et 68.6% au mois d'Août.

2.3. Puissance crête du generateur photovoltaïque

La puissance crête est donnée par la formule suivante :

$$P_c = \frac{\text{charge journalière}}{(\eta_{\text{Global}} \cdot E_i)}$$

Avec :

- P_c est la puissance crête du générateur photovoltaïque.
- E_i est l'irradiation solaire journalière reçue par une surface unitaire (1 m²) du champ photovoltaïque, en prenant en compte l'orientation et l'inclinaison de celui-ci.

La puissance crête calculée pour les mois de Décembre et d'Aout est la suivante :

	Décembre	Août
Puissance crête (kWc)	0,314	0,201

La puissance à installer est alors de 314Wc

2.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque

On choisit un module de 315 Wc

Le générateur photovoltaïque est alors composé d'un module

3. Dimensionnement du parc de batteries

3.1. Choix de la tension du parc de batteries

Le choix de la tension de la batterie dépend de la tension de sortie du régulateur et de la tension de fonctionnement des lampes. Elle est alors de 24 V

3.2. Choix de la capacité du parc de batteries

Le nombre minimal d'autonomie de la batterie est :

- 03 jours pour la Z1
- 02 jours pour la Z2 et Z3

Le client est à Tunis (Zone 2),

La capacité du parc de batteries est calculée de la manière suivante :

$$C \text{ (Ah)} = \frac{\text{charge journalière} \cdot \text{autonomie}}{U_{\text{bat}} \cdot \eta_{\text{batterie}} \cdot \eta_{\text{régulateur}} \cdot (1 - \text{pertes}) \cdot \text{coef de décharge profonde}}$$

La capacité du parc de batteries calculée pour les mois de Décembre et Août est la suivante :

	Décembre	Août
Capacité Batterie (Ah)	202.6	177.9

On opte pour une batterie 12 V avec une capacité supérieure à 203 Ah en C100

Le parc de batterie est ainsi composé de deux batteries en série

4. Choix du régulateur de charge/décharge

Le générateur photovoltaïque est composé de deux modules en série dont les caractéristiques suivantes :

Puissance du module (kWc)	0,315
UocSTC (V)	45,960
Uoc (-10°C) (V)	50,971
Isc STC (A)	8,840
Isc (Tmax) (A)	9,110

Le choix du régulateur s'effectue selon les critères suivants.

- L'intensité maximale admissible par le circuit d'entrée du régulateur : doit être supérieure à la somme des courants de court-circuit des modules photovoltaïques montés en parallèle à Tmax.
- L'intensité admissible du courant de sortie du régulateur qui doit être supérieure à la valeur maximale appelée par les récepteurs DC. Le courant maximum appelé par les charges DC pendant une heure doit être inférieur à 10% de la capacité de la batterie.
- Courant de charge : celui qui permet de charger la batterie
- La plage de tension d'entrée : la tension à circuit ouvert délivrée par le générateur photovoltaïque à -10°C.
- La tension de sortie : 24 V

On choisit un régulateur PWM avec les caractéristiques suivantes : UDCmax = 55 V, I_{max} = 10 A

5. Dimensionnement des câbles DC

Les chutes de tension ΔU maximales doivent être :

- Inférieure à 1 % entre la batterie et le régulateur de charge
- Inférieure à 1 % entre le champ photovoltaïque et le régulateur de charge
- Inférieure à 1 % entre le régulateur de charge et les luminaires

Avec $\Delta U = (\rho \cdot L / S) \times I$

L : Longueur du câble (en mètre)

S : Section du câble (en mm²)

ρ : Résistivité du conducteur en Ω.mm²/m

<ul style="list-style-type: none"> - Résistivité $r = 0.023 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ - $U_1 = 36.76$ - Nombre de modules par chaîne = 1 - Nombre de chaînes = 1 - La longueur du câble DC est 2 fois la distance (m) 	DC	Distance (m)	section (mm ²)	intensité (A)	R (Ω)	Δ U /U (V)
	Module-Régulateur	3	6	8,7	0,012	0,54%
	Régulateur-Batterie	5	10	10	0,012	0,96%
	Régulateur-lampe	2	10	5	0,005	0,19%
	Δ U/U Total (%)					1,69%

Elaboré par

Agence Nationale pour la Maitrise de l'Energie (ANME)

Cité Administrative Montplaisir, Avenue de Japon B.P.213

T +216 71 906 900

F +216 71 904 624

E boc@anme.nat.tn

W www.anme.nat.tn

En partenariat avec

Projet de Renforcement du Marché Solaire en Tunisie

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

B.P. 753, 1080 Tunis-Cedex Tunesien / Tunisie

T +216 71 901 355

F +216 71 908 960

E info@giz.de

W www.giz.de

Responsables

Karim Nefzi, ANME

Mohamed Ali Farhat, ANME

Sana Kacem, ANME

Mohamed Maghrebi, GIZ

